

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК

Кафедра фундаментальной математики и механики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

Заведующий кафедрой

 д.ф.-м.н., доцент
Татосов А.В.
2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
«ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕАГИРУЮЩЕЙ БИНАРНОЙ СМЕСЬЮ НА
ПРОДУКТИВНЫЙ ПЛАСТ»

01.04.01 Математика

Магистерская программа «Математическое моделирование»

Выполнил работу
студент 2 курса
очной формы обучения



Борисов
Константин
Сергеевич

Руководитель работы
доктор ф-м наук,
профессор кафедры
фундаментальной математики и механики



Татосов
Алексей
Викторович

Рецензент
к.ф.-м.н., научный сотрудник
ТюмФ ИТПМ СО РАН



Борodin
Станислав
Леонидович

Тюмень, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	2
2. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	5
3. КИНЕТИКА РЕАКЦИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ	8
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА.....	12
4.1. Построение математической модели.....	12
4.2. Обезразмеривание.....	20
5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	33

1. ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент в нефтяной отрасли РФ наблюдается тенденция медленного истощения запасов на большинстве нефтяных месторождений Зап. Сибири и увеличение доли ТРИЗ (высоковязкая нефть, битум и др.) в минерально-сырьевой базе. Отсюда возникает ряд основных вызовов, вектор которых направлен на всестороннее развитие нефтегазового комплекса РФ, а именно - усовершенствование текущих технологий добычи УВ, а также внедрение новейших методов увеличения КИН.

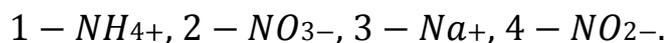
В настоящее время можно выделить следующие группы методов увеличения добычи: гидродинамические; физико-химические; тепловые и другие. Если рассматривать воздействие на пласт, то более эффективным будет комбинирование методов воздействия.

Одну из главенствующих групп МУН стоит рассмотреть отдельно от остальных – это физические методы. Здесь потенциал вытесняющего УВ агента происходит за счет использования энергии пласта, такие методы приводят к не долгосрочному увеличению продуктивности пласта. К таким методам можно отнести: ГРП, горизонтальные стволы, электромагнитное воздействие, волновое воздействие на пласт и другие подобные методы.

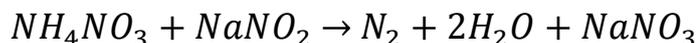
Актуальны у нас в стране комбинированные методы. Одним из часто используемых комбинированных методов интенсификации притока жидкости к скважине является метод термогазохимического воздействия на продуктивный пласт (ТГХВ) реагирующей бинарной смесью (БС). Этот метод является относительно новой разработкой, поскольку в стране проводятся ОПР с последующей оценкой результатов. Суть процесса заключается в обработки призабойной зоны реагентами: NH_4NO_3 – аммиачная селитра (тепловыделяющий компонент) и NaNO_2 – нитрита натрия (катализатор процесса реагирования).

Селитра – является широкодоступным энергоемким материалом, поскольку производится в крупных масштабах в химической промышленности, поэтому данный способ является одним из самых

экономически выгодных. Бинарная смесь представляет собой водный раствор двух солей: нитрита натрия ($NaNO_2$) и нитрата аммония (NH_4NO_3). Реагенты распадаются на ионы:



Ниже представлена реакция самого реагирующего процесса:



где NH_4NO_3 - аммиачная селитра, $NaNO_2$ - нитрит натрия, $NaNO_3$ - натриевая селитра.

Тема работы имеет теоретический и практический интерес, так как этот метод является эффективным с точки зрения увеличения нефтеотдачи. Происходит одновременное уменьшение вязкости нефти за счет повышения температуры, а также интенсификация притока УВ путем авто-разрыва пласта.

Цель работы заключена в построение математической модели процесса, который происходит в пласте при обработке, описать все эти процессы, происходящие при закачке БС в пласт.

Можно выделить главные задачи данной выпускной квалификационной работы:

- изучение процессов, которые происходят в ПЗП во время реакции БС;
- изучение опыта применения на просторах РФ, а также за пределами государства;
- построение математической модели, которая описывает происходящий процесс;
- решение задачи;
- анализ полученных результатов.

2. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

По статистике если брать коэффициент извлечения нефти (КИН) на различных месторождениях США, то получится что он близок к 0,6, а на месторождениях России - 0,4. При этом под землей остаётся нефть, масса которой близка к массе нефти, извлеченной из недр за всю историю её добычи. В последние десятки лет наметился технологический прорыв в результате создания комплексной системы управления процессом реакции бинарных смесей (БС), а КПД работ повысился почти в 3 раза [17].

Бинарные смеси (БС) – это водные растворы селитр и инициатора реакции их разложения [17].

Область применения закачки БС в продуктивный пласт:

- Законсервированные скважины (малодебитные).
- Месторождения высоковязкой нефти и битумов (Восточно-Мессояхское).

В период с 1982 по 2012 годы закачка БС в пласт была без научной базы, правительство РФ разрешал закачивать БС лишь малыми дозами –закачивали в пласт не более одной тонны реагирующей смеси в одну вертикальную скважину. Во время протекания реакции могло выделиться около 1000 м³ газа, который уменьшал скин-фактор.[18].

Система закачки селитры и инициатора её разложения в скважину – это термохимический газогенератор (ТГ), при работе которого вся закачиваемая в пласт селитра превращается в газ и тепло по реакции:
$$\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{O}_2 + \text{Q1} \quad [17].$$

Реакция разогревает призабойную зону и создаёт условия для осуществления добычи путем газлифта, который работает, за счёт энергии окисления нефти кислородом, выделившимся в реакции. Газированная нефть, как замечено в практике, после повышения давления и открытия вентилей фонтанирует.

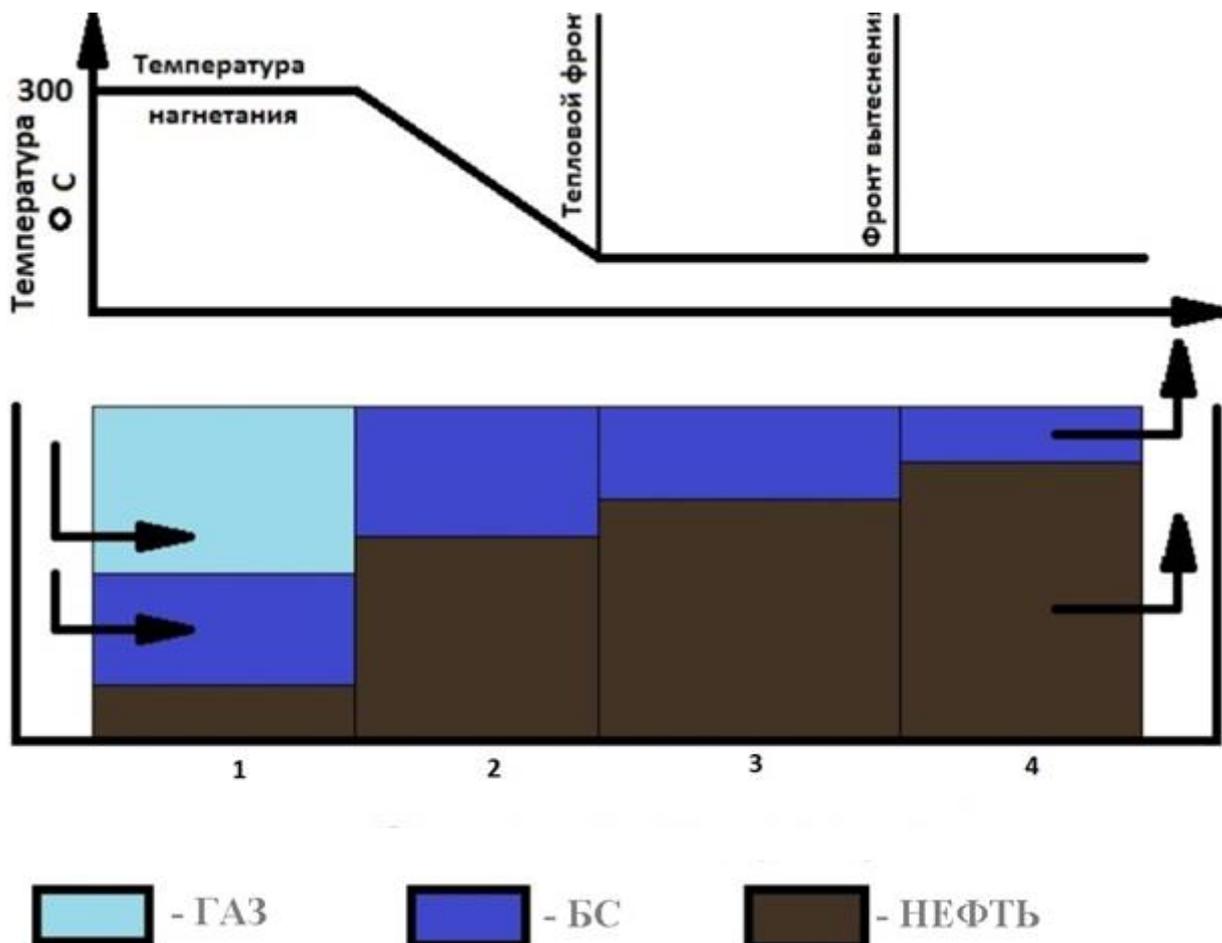


Рисунок 2.1. – Процесс закачки (подземная часть)

ТГ – это двигатель нового типа – двигатель внутрислоевого сгорания нефти. ТГ может обеспечить откачку горячего флюида из скважины при температуре, значительно превышающей предельную для работы промышленных механических насосов.

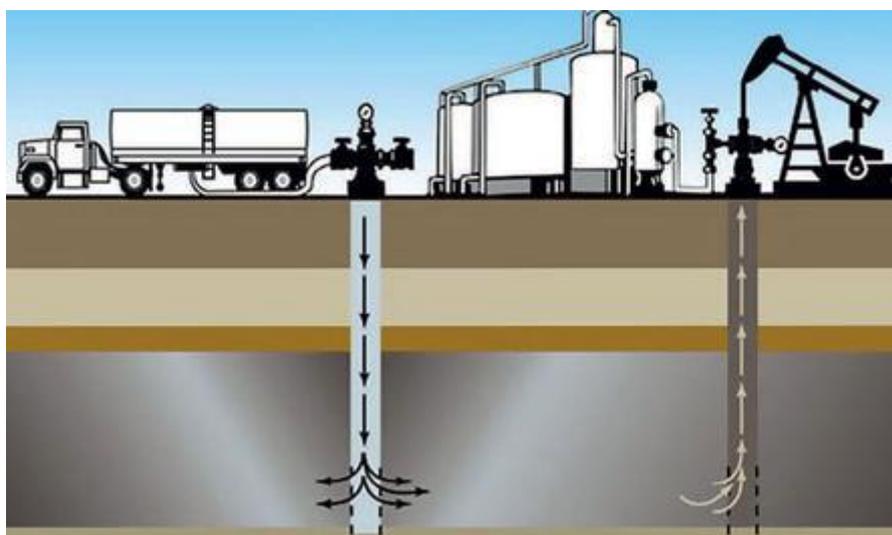


Рисунок 2.2. – Процесс закачки (наземная часть)

Летом 2013г. технология закачки БС в пласт была испытана в США (Eastland, штат Техас). На месторождении, которое признанном выработанным и законсервировано в 1994 г. промышленниками, выбрали две скважины (№ № 8В и 10В). Эти скважины вновь оборудовали с целью откачки нефти.

В течение первой недели работы при пробных откачках из этих скважин получали воду с пленкой нефти. На вторую неделю в скважины закачали 55 тонн растворов реагирующей бинарной смеси. Реакция в стволах скважин протекала при температуре 200-340°C. Оценки, произведённые на основе опыта, полученного на скважинах скв. №№ 1242 и 3003 в Усинске, привели авторов к выводу о повышении температуры до 600-700°C в пласте около скважины № 8В за счёт окисления нефти кислородом, выделившимся в реакции (1). После выдержки скважины в течение 4-х суток в закрытом состоянии, открыли вентили. Скважина начала фонтанировать нефтью с примесью воды. Дебит увеличился с нуля до 17 тонн в сутки.

Фонтанирование горячего флюида продолжались около четырех суток. После падения температуры флюида ниже 150°C откачку было решено опускать насос для дальнейшей откачки флюида. В течение недели процент обводненности снизился с 30% до 1%. При этом был установившийся режим добычи – около 11 тонн нефти в сутки.

3. КИНЕТИКА РЕАКЦИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ

В работе рассматриваем химическую реакцию взаимодействия нитрата аммония и нитрита натрия, которая является экзотермической реакцией окисления.

Эта реакция позволяет обеспечить по максимуму использование всего потенциала реагирующей бинарной смеси.

Компоненты реагирующей бинарной смеси в экзотермических реакциях горения в пласте имеют строго определенное стехиометрическое соотношение каждой из компонент реакции. Для получения концентрации реагирующей бинарной смеси будем использовать закон действующих масс, т.е. упрощенный закон Гульдберга-Вааге:

$$j = kc_{ek} , \quad (3.1)$$

где j - скорость протекающей химической реакции, k - константа скорости реакции, c_{ek} - массовая концентрация компонент бинарной смеси.

Масса веществ, которые находятся в момент реакции в пласте, изменяется за счет закачки в него БС и протекания химической реакции. Отсюда введем понятие активной фазы – компоненты, которые участвуют в реакции, т.е. бинарная смесь, нефть, вода и газ можно получить скорость притока/оттока массы в системе:

$$J = jmS^*\rho = kc_{ek}mS^*\rho , \quad (3.2)$$

где J - убыль/прибыль массы [кг/м³с], m - пористость, S^* - средняя насыщенность фазой, ρ – плотность активной фазы [кг/м³].

Для определения скорости изменения массы будем использовать уравнение Аррениуса – уравнение, которое выражает зависимость между скоростью протекания реакции и температуры:

$$k = A \exp\left\{-\frac{E_a}{RT}\right\}, \quad (3.3)$$

где A - константа, которая характеризует частоту столкновений реагирующих молекул, E_a - энергия активации реакции, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Аррениус использует понятие энергии активации реакции - E_a . Эта энергия, которой должна обладать смесь, чтобы произошла химическая реакция. Он использовал предположение, что если энергия, при которой сталкиваются молекулы, будет меньше энергии активации реакции, то ничего не произойдет (молекулы не вступят в реакцию), в противном случае, молекулы прореагируют.

Подставив (3.3) в (3.2) получим уравнение, которое описывает скорость реакции:

$$J = AmS^* \rho \exp\left\{-\frac{E_a}{RT}\right\} c_e. \quad (3.4)$$

Из экспериментальных данных [3] известно, что при пластовых условиях: $T = T_0$ характерное время реакции τ_0 . А при $T_1 = 1,5 T_0$, характерное время реакции τ_1 . используя уравнение (3.3) получим:

$$\begin{cases} \frac{1}{\tau_0} = A \exp\left\{-\frac{E_a}{T_0 R}\right\} \\ \frac{1}{\tau_1} = A \exp\left\{-\frac{E_a}{T_1 R}\right\} \end{cases} \quad (3.5)$$

Выделим из системы (3.5) отношение характерных времен реакции:

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = \exp\left\{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right\} \quad (3.6)$$

Из (3.6) выразим энергию активации реакции, а из уравнения (3.5) выразим константу А:

$$E_a = \frac{R}{\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)} \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right) \quad (3.7)$$

$$A = \frac{1}{\tau_0} \exp\left\{\frac{E_a}{T_0 R}\right\} \quad (3.8)$$

Подставим (3.7) в (3.8):

$$A = \frac{1}{\tau_0} \exp\left\{\frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_1}} \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)\right\} \quad (3.9)$$

Возьмем уравнение (3.9) и подставим его в (3.4), отсюда получаем скорость изменения массы:

$$J = \frac{mS^* \rho c_{ek}}{\tau_0} \exp\left\{\ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right) \left(\frac{T_1/T_0}{T_1/T_0 - 1}\right) \left(\frac{T - T_0}{T}\right)\right\} \quad (3.10)$$

Либо

$$J = \frac{mS^* \rho c_{ek}}{\tau_0} \exp\left\{\alpha \left(\frac{T - T_0}{T}\right)\right\} \quad (3.10^*)$$

где $\alpha = \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right) \left(\frac{T_1/T_0}{T_1/T_0 - 1}\right)$ – безразмерный параметр, определяющий

ускорение реакции при повышении температуры.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

4.1. Построение математической модели

Сумма концентраций равна единице. Тогда представим в виде этой суммы концентрация активной фазы :

$$1 = c_w + c_{ek} + c_g + c_o \quad (4.1.1)$$

Плотность для активной фазы выразим следующим выражением:

$$\rho = c_g \rho_g + c_o \rho_o + (1 - c_g - c_o) \rho_w, \quad (4.1.2)$$

Воспользуемся законом сохранения массы:

$$\rho'_i = \frac{m'_i}{V} = m S^* c_i \rho \quad (4.1.3)$$

где ρ'_i - плотность компонента активной фазы (приведенная), m'_i - масса компонента активной фазы, V - объем пласта, m - пористость, S^* - средняя насыщенность, c_i - концентрация компонента активной фазы, ρ - плотность активной фазы.

Если рассматривать фильтрацию одного флюида, можем получить уравнение сохранения массы для данной системы

$$\frac{\partial \rho'_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho'_i v}{\partial x} = q \quad (4.1.4)$$

где v - скорость движения активной фазы [м/с], q - интенсивность стока (масса единицы объема в единицу времени).

С учетом (4.1.3) и (4.1.4) и того, что пористость и насыщенность принимаются постоянными, система уравнений неразрывности для каждого из компонентов активной фазы примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} mS^* \frac{\partial c_{ek}\rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial c_{ek}\rho v}{\partial x} = -J \\ mS^* \frac{\partial c_g\rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial c_g\rho v}{\partial x} = kJ \\ mS^* \frac{\partial c_o\rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial c_o\rho v}{\partial x} = 0 \\ mS^* \frac{\partial (1-c_g-c_{ek}-c_o)\rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial (1-c_g-c_{ek}-c_o)\rho v}{\partial x} = (k-1)J \end{array} \right. , \quad \begin{array}{l} (4.1.5) \\ (4.1.6) \\ (4.1.7) \\ (4.1.8) \end{array}$$

Поскольку в процессе протекания реакции БС в пласте происходит медленное уменьшение концентрации БС, то правая часть уравнения (4.1.5) меньше нуля и имеет название «сток», а концентрация газа наоборот увеличивается, отсюда правая часть уравнения (4.1.6) больше нуля и имеет название «источник». Поскольку концентрация нефти не изменяется, то правая часть выражения (4.1.7) равна нулю. Поскольку система уравнений замкнута, то сумма уравнений неразрывности даст нам нуль.

Упростим полученную систему уравнений. Для простоты возьмем, что плотности газа, нефти и воды величины являются константами.

Подставим (4.1.2) в (4.1.5):

$$\begin{aligned} & \rho_g \frac{\partial c_{ek}c_g}{\partial t} + \rho_o \frac{\partial c_{ek}c_o}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_{ek}c_g}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_{ek}c_o}{\partial t} \\ & + \rho_g \frac{\partial c_{ek}c_g v}{\partial x} + \rho_o \frac{\partial c_{ek}c_o v}{\partial x} + \rho_w \frac{\partial c_{ek}v}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial c_{ek}c_g v}{\partial x} \\ & - \rho_w \frac{\partial c_{ek}c_o v}{\partial x} = \frac{-J}{mS^*} \end{aligned} \quad (4.1.9)$$

Будем пренебрегать величинами 2-го порядка малости для концентрации ($c_i c_j$ и c_i^2 пренебрежимо мало). Отсюда первое уравнение системы представится в виде:

$$\rho_w \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_{ek}v}{\partial x} = \frac{-J}{mS^*} \quad (4.1.10)$$

По аналогии подставляем (4.1.2) в (4.1.6), (4.1.7) и в (4.1.8).

$$\rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} = \frac{kJ}{mS^*} \quad (4.1.11)$$

$$\rho_w \frac{\partial c_o}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_o v}{\partial x} = 0 \quad (4.1.12)$$

$$\begin{aligned} \rho_g \frac{\partial c_g}{\partial t} - 2\rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_o \frac{\partial c_o}{\partial t} - 2\rho_w \frac{\partial c_o}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + \rho_g \frac{\partial c_g v}{\partial x} \\ + \rho_o \frac{\partial c_o v}{\partial x} + \rho_w \frac{\partial v}{\partial x} - 2\rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} - 2\rho_w \frac{\partial c_o v}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial c_{ek} v}{\partial x} \quad (4.1.13) \\ = \frac{(1-k)J}{mS^*} \end{aligned}$$

Просуммируем уравнения (4.1.10), (4.1.11), (4.1.12) и (4.1.13):

$$\begin{aligned} \rho_g \frac{\partial c_g}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_g \frac{\partial c_g v}{\partial x} + \rho_o \frac{\partial c_o}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_o}{\partial t} + \rho_o \frac{\partial c_o v}{\partial x} \quad (4.1.14) \\ + \rho_w \frac{\partial v}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial c_o v}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

Приведем подобные.

$$\begin{aligned} - \left(\rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} \right) - \left(\rho_w \frac{\partial c_o}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_o v}{\partial x} \right) + \quad (4.1.15) \\ + \left(\rho_g \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_g \frac{\partial c_g v}{\partial x} \right) + \left(\rho_o \frac{\partial c_o}{\partial t} + \rho_o \frac{\partial c_o v}{\partial x} \right) + \rho_w \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

Далее сравним уравнение (4.1.13) и левые части уравнений (4.1.11) и (4.1.12). Домножим уравнение (4.1.15) на $\frac{\rho_w}{\rho_g}$. Заменяем на правые части (4.1.11) и (4.1.12) и получим уравнение для отображения производной скорости активной фазы:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w} \frac{kJ}{mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) \quad (4.1.16)$$

Затем подставляем (4.1.16) в (4.1.10), (4.1.11), (4.1.12), а также распишем подобно в них второй член в левой части.

$$\rho_w \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_{ek}}{\partial x} + c_{ek} \frac{kJ}{mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) = \frac{-J}{mS^*} \quad (4.1.17)$$

$$\rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial x} + c_g \frac{kJ}{mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) = \frac{kJ}{mS^*} \quad (4.1.18)$$

$$\rho_w \frac{\partial c_o}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_o}{\partial x} + c_o \frac{kJ}{mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) = 0 \quad (4.1.19)$$

Из раздела 3 нам известно, что скорость протекания реакции пропорциональна концентрации бинарной смеси - (3.10*), поэтому с учетом малости концентрации пренебрегаем третьим членом в уравнениях (4.1.17) - (4.1.19).

В конечном итоге система примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + v \frac{\partial c_{ek}}{\partial x} = \frac{-J}{\rho_w mS^*} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w mS^*} \\ \frac{\partial c_o}{\partial t} + v \frac{\partial c_o}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) \end{array} \right. \quad (4.1.20)$$

Чтобы учесть тепло, которое будет выделяться в процессе реагирования бинарной смеси в пласте дополним полученную систему (4.1.20) уравнением, которое описывает приток тепла.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial Uv}{\partial x} = JQ \quad (4.1.21)$$

где U - внутренняя энергия пористой среды, Q – количество теплоты, которое выделяется во время реакции.

Затем введем представление внутренней энергии пористой среды как сумму различных энергий, т.е. это сумма породы и каждого из флюидов:

$$U = U_r + U_o + U_w \quad (4.1.22)$$

либо

$$U = (1 - m)\varphi_r\rho_r(T - T_0) + \\ + m(1 - S^*)\varphi_o\rho_o(T - T_0) + mS^*\varphi_w\rho_w(T - T_0) \quad (4.1.23)$$

где U_r, U_o, U_w – внутренние энергии породы, нефти и воды, φ_r - теплоемкость породы, ρ_r - плотность породы, T_0 - температура пласта, φ_o - удельная теплоемкость нефти, ρ_o - плотность нефти, φ_w - удельная теплоемкость воды.

Подставляем наше уравнение энергии системы (4.1.23) в (4.1.21), получим:

$$[(1 - m)\varphi_r\rho_r + m(1 - S^*)\varphi_o\rho_o + mS^*\varphi_w\rho_w] \frac{\partial T - T_0}{\partial t} + \\ + mS^*\varphi_w\rho_w \frac{\partial(T - T_0)v}{\partial x} = JQ \quad (4.1.24)$$

Для компактности отображения введем обозначение:

$$H = (1 - m)\varphi_r\rho_r + m(1 - S^*)\varphi_o\rho_o + mS^*\varphi_w\rho_w, \quad (4.1.25)$$

$$H_w = mS^*\varphi_w\rho_w \quad (4.1.26)$$

Перепишав уравнение в новых обозначениях, получим:

$$H \frac{\partial T - T_0}{\partial t} + H_w \frac{\partial (T - T_0)v}{\partial x} = JQ \quad (4.1.27)$$

Возьмем сложную производную:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} \frac{\partial v}{\partial x} (T - T_0) + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} \quad (4.1.28)$$

Далее подставляем в полученное уравнение (4.1.28) уравнение для скорости (4.1.16). Тогда уравнение притока тепла примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) (T - T_0) \quad (4.1.29)$$

Отсюда получаем систему, которая описывает процессы реакции воздействия реагирующей бинарной смесью на продуктивный пласт:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + v \frac{\partial c_{ek}}{\partial x} = \frac{-J}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial c_o}{\partial t} + v \frac{\partial c_o}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) (T - T_0) \end{array} \right. \quad (4.1.30)$$

Воспользуемся уравнением, которое получили в прошлом разделе для скорости химической реакции – (3.10*) и подставим его в получившуюся систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + v \frac{\partial c_{ek}}{\partial x} = -\frac{c_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial c_o}{\partial t} + v \frac{\partial c_o}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) (T - T_0) \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \end{array} \right. \quad (4.1.31)$$

Затем определим возникающее давление в пласте при реагировании бинарной смеси. Одномерная фильтрация двухфазной смеси представима в виде:

$$v = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP_1}{dx}, \quad (4.1.31)$$

где v - скорость фильтрации, k - проницаемость, μ_o - вязкость нефти, μ_w - вязкость воды, f_w - относительная фазовая проницаемость водной фазы, f_o - относительная фазовая проницаемость нефти.

Согласно уравнению (4.1.16) можно заметить, что скорость не зависит от концентрации газа, отсюда возникает необходимость учета парциального давления газа. Выделяемый газ будем считать идеальным.

$$P_g = R_g \rho T, \quad (4.1.32)$$

где R_g - газовая постоянная, ρ - плотность газа, T - температура.

Снова воспользуемся (4.1.3) и определением массового расхода

$$\frac{M}{t} = \rho_0 v_0 S_p, \quad (4.1.33)$$

где t - время закачки, ρ_0 - начальная плотность бинарной смеси, v_0 - скорость закачки, S_p - площадь сечения потока (площадь сечения пор),

$$m S^* c_p V = \rho_0 v_0 S_p t,$$

$$\rho = \frac{\rho_0 v_0 S_p t}{m S^* c S_x} = \frac{\rho_0 v_0 t}{S^* c x}, \quad (4.1.34)$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{S^* c}. \quad (4.1.35)$$

Далее подставляем (4.1.35) в (4.1.33):

$$P_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} T. \quad (4.1.36)$$

Отсюда мы получаем, что давление в продуктивном пласте при закачке в него бинарной смеси будет являться суммой (4.1.32) и (4.1.36):

$$P = P_g + P_l \quad (4.1.37)$$

В конечном итоге система примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{ek}}{\partial t} + v \frac{\partial c_{ek}}{\partial x} = -\frac{c_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial c_o}{\partial t} + v \frac{\partial c_o}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) (T - T_0) \frac{kc_{ek}}{\tau_0} \exp \left\{ \alpha \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \right\} \\ v = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP_l}{dx} \\ P_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} T \\ P = P_g + P_l \end{array} \right. \quad (4.1.38)$$

Система уравнений (4.1.38) описывает процессы, протекающие в призабойной зоне в результате реакции бинарной смеси.

При постановке задачи использовали следующие допущения, что это плоский одномерный процесс; плотность активной фазы зависит от количества выделяемого газа и содержания нефти; кинетика горения реагирующей бинарной смеси описываем уравнением Аррениуса, во время протекания реакции выделяется газ, который мы считаем идеальным, он изменяет плотность активной фазы; в работе пренебрегаем теплопроводностью фаз; скелет породы в реакции не участвует.

4.2. Обезразмеривание

В системе нелинейных уравнений в частных производных (4.1.38) величины стоящие в уравнениях различаются порядком. Для перехода от абсолютных значений – расстояний, скоростей, времен, температур– к относительным, воспользуемся операцией обезразмеривания переменных.

Введем следующие безразмерные параметры для нашей системы:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad (4.2.1)$$

$$\bar{t} = \frac{t}{\tau_0} \quad (4.2.2)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{V_0 \tau_0} \quad (4.2.3)$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T} \quad (4.2.4)$$

где \bar{V} – безразмерная скорость, V_0 - скорость закачки бинарной смеси в пласт [м/с], \bar{t} – безразмерное время, τ_0 – характерное время прохождения химической реакции [с], \bar{x} – безразмерная координата, \bar{T} – безразмерная температура, T_0 – температура пласта [K].

Итак, подставим (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3) и (4.2.4) в первое уравнение системы (4.1.38).

$$\frac{1}{\tau_0} \frac{\partial c_{ек}}{\partial \bar{t}} + \frac{\bar{V} V_0}{V_0 \tau_0} \frac{\partial c_{ек}}{\partial \bar{x}} = - \frac{\exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ек}}{\tau_0} \quad (4.2.5)$$

Сокращая величины в обеих частях уравнения, окончательно получим:

$$\frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{x}} = -\exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek} \quad (4.2.6)$$

Аналогично подставим (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3) и (4.2.4) в оставшиеся уравнения системы (4.1.38), кроме уравнения притока тепла. Тогда получившиеся уравнения примут вид:

$$\frac{\partial c_g}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_g}{\partial \bar{x}} = k \exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek} \quad (4.2.7)$$

$$\frac{\partial c_o}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_o}{\partial \bar{x}} = 0 \quad (4.2.8)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} = k \exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek} \quad (4.2.9)$$

Проведем операцию обезразмеривания пятого уравнения системы. Подставляем (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3) и (4.2.4):

$$\frac{T^2}{T_0} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \frac{H_w}{H} \frac{T^2}{T_0} \frac{V_0 \bar{V}}{V_0 \tau_0} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \quad (4.2.10)$$

$$= \frac{m S^* \rho_w Q \exp\{\alpha \bar{T}\} c_e}{\tau_0 H} - (T - T_0) \frac{H_w k \exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek}}{H \tau_0}$$

, где $\lambda = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}$

или

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{H_w}{H} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \quad (4.2.11)$$

$$= \frac{T_0}{T^2} \frac{m S^* \rho_w Q \exp\{\alpha \bar{T}\} c_e}{H} - \frac{T_0 \bar{T}}{T} \frac{H_w k \exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek}}{H}$$

Рассмотрим правую часть уравнения (4.2.11). Вынесим $\exp\{\alpha\bar{T}\}c_e$ за скобку. Подставим T , выраженную из уравнения (4.2.4)

$$T = \frac{T_0}{1 - \bar{T}} \quad (4.2.4^*)$$

Отсюда правая часть примет вид:

$$\begin{aligned} & \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \left[\frac{T_0}{T^2} \frac{mS^* \rho_w Q}{H} - \frac{T_0 \bar{T}}{T} \frac{H_w k \lambda}{H} \right] = \\ & = \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \left[\frac{T_0(1 - \bar{T})^2}{T_0^2} \frac{mS^* \rho_w Q}{H} - \bar{T}(1 - \bar{T}) \frac{H_w k \lambda}{H} \right] \end{aligned} \quad (4.2.12)$$

Раскрываем скобки в правой части (4.2.12). Считаем пренебрежительно малыми величины содержащие T^2 :

$$\begin{aligned} & \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \left[\frac{T_0(1 - \bar{T})^2}{T_0^2} \frac{mS^* \rho_w Q}{H} - \bar{T}(1 - \bar{T}) \frac{H_w k \lambda}{H} \right] = \\ & = \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \left[\frac{1}{T_0} \frac{mS^* \rho_w Q}{H} - \frac{2\bar{T}}{T_0} \frac{mS^* \rho_w Q}{H} - \bar{T} \frac{H_w k \lambda}{H} \right] \end{aligned} \quad (4.2.13)$$

Вводим безразмерные коэффициенты подобия ξ и β . Затем приравниваем к левой части уравнения (4.2.11):

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{H_w}{H} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek}(\xi - \beta\bar{T}) \quad (4.2.14)$$

, где $\xi = \frac{mS^* \rho_w Q}{HT_0}$ и $\beta = \frac{2mS^* \rho_w Q}{HT_0} + \frac{k\lambda H_w}{H}$

Домножим правую часть ξ на Φ_w/φ_w и переобозначим некоторые величины с учетом (4.1.26). А в β выделим безразмерный коэффициент ξ . И, вводя новые безразмерные константы, получим:

$$\xi = \xi_1 \xi_2 \quad (4.2.15)$$

$$\beta = 2\xi_1 \xi_2 + k\lambda \xi_1 \quad (4.2.16)$$

,где

$$\xi_1 = \frac{H_w}{H} \quad (4.2.17)$$

$$\xi_2 = \frac{Q}{\varphi_w T_0} \quad (4.2.18)$$

,где ξ_1 - отношение теплоемкостей воды и насыщенной пористой среды, а ξ_2 – это отношение теплоты, выделяющейся в результате реакции к исходной теплоте насыщенной пористой среды.

Уравнение Дарси принимает следующий вид:

$$\bar{V} = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{P_0}{V_0^2 \tau_0} \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} = \varepsilon \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \quad (4.2.19)$$

где

$$\varepsilon = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{P_0}{V_0^2 \tau_0}$$

Уравнение парциального давления газа

$$P_0 \bar{P}_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} \frac{T_0}{P_0 (1 - \bar{T})} = \gamma \frac{1}{1 - \bar{T}} \quad (4.2.20)$$

где

$$\gamma = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} \frac{T_0}{P_0}$$

Таким образом, система уравнений в обезразмеренном виде принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{x}} = -c_{ek} \exp\{\alpha \bar{T}\} \\ \frac{\partial c_g}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_g}{\partial \bar{x}} = c_{ek} k \exp\{\alpha \bar{T}\} \\ \frac{\partial c_o}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_o}{\partial \bar{x}} = 0 \\ \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} = k \lambda c_{ek} \exp\{\alpha \bar{T}\} \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{H_w}{H} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \exp\{\alpha \bar{T}\} c_{ek} (\xi - \beta \bar{T}) \\ \bar{V} = \varepsilon \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \\ \bar{P}_g = \frac{\gamma}{(1-\bar{T})} \end{array} \right. \quad (4.2.21)$$

Путем обезразмеривания системы нелинейных уравнений было получено 7 констант обезразмеривания ($\alpha, k, \lambda, \xi_1, \xi_2, \varepsilon, \gamma$).

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Метод характеристик – это метод численного интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Впервые для ряда частных случаев был рассмотрен в работах Даламбера. В настоящее время метод характеристик широко применяется в задачах распространения волн в гидрогазодинамике. Метод заключается в приведении уравнения в частных производных к семейству обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для начала рассмотрим первое уравнение из системы (4.2.21).

$$\frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{x}} = -c_{ek} \exp\{\alpha \bar{T}\} \quad (5.1)$$

Считаем, что $c_{ek} = c_{ek}(\bar{x}, \bar{t})$. Тогда, дифференцируя по времени получим:

$$\frac{dc_{ek}}{d\bar{t}} = \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{x}} \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} + \frac{\partial c_{ek}}{\partial \bar{t}} \quad (5.2)$$

Сравним уравнение (5.1) и взятое (5.2) уравнение. Для идентичности необходимо, чтобы их левые части и коэффициенты при $\frac{\partial c_e}{\partial \bar{x}}$ были равны:

$$\frac{dc_{ek}}{d\bar{t}} = -c_{ek} \exp\{\alpha \bar{T}\}, \quad \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{V} \quad (5.3)$$

Аналогично для остальных уравнений, получаем следующую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dc_{ek}}{d\bar{t}} = -\exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \\ \frac{dc_g}{d\bar{t}} = k\exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \\ \frac{dc_o}{d\bar{t}} = 0 \\ \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} = \lambda\exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek} \\ \frac{d\bar{T}}{d\bar{t}} = \exp\{\alpha\bar{T}\}c_{ek}(\xi - \beta\bar{T}) \\ \frac{d\bar{x}_{ek}}{d\bar{t}_{ek}} = \bar{V} \\ \frac{d\bar{x}_g}{d\bar{t}_g} = \bar{V} \\ \frac{d\bar{x}_o}{d\bar{t}_o} = \bar{V} \\ \frac{d\bar{x}_{\bar{V}}}{d\bar{t}_{\bar{V}}} = 0 \\ \frac{d\bar{x}_{\bar{T}}}{d\bar{t}_{\bar{T}}} = \frac{H_w\bar{V}}{H} \\ \bar{V} = \delta \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \\ \bar{P}_g = \frac{\psi}{(1 - \bar{T})} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Воспользовавшись методом характеристик были получены обыкновенные дифференциальные уравнения.

Первое уравнение в системе решаем методом разделения переменных, а остальные будем решать методом конечных разностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{ek} = c_0 e^{\rho_B n \Delta t} \\ c_{g_i}^n = c_{g_{i-1}}^{n-1} + \Delta t k c_{ek_{i-1}}^{n-1} \\ \Delta \bar{x}_i^n = \Delta t \bar{v}_{i-1}^n \\ \bar{v}_i^n = \bar{v}_{i-1}^n + \Delta \bar{x}_i^n k \lambda c_{ek_{i-1}}^n \\ \bar{x}_i^n = \bar{x}_i^{n-1} + \Delta t \frac{H_B}{H} \bar{v}_i^n \\ \bar{T}_i^n = e^{\alpha \bar{T}_i^n} c_{ek_i}^n (1 - \beta \bar{T}_{i-1}^n) \Delta t + \bar{T}_i^{n-1} \end{array} \right. , \quad (5.5)$$

где Δt - шаг по времени.

Для решения задачи в уравнении тепла было допущение ($T = \text{const}$).

Рассматривая изменение концентрации БС в зависимости от глубины проникновения в пласт с течением времени (рисунок 5.1). Можно заметить, что по мере проникновения в продуктивный пласт концентрация бинарной смеси уменьшается. Достигнув пересечения с кривой переднего фронта

закачки концентрация становится равной начальному значению (т.е. $C=0$). Резкое падение концентрации происходит из-за возрастающей температуры, поскольку химическая реакция является самоускоряющейся. По мере увеличения времени бинарная смесь проникает в пласт все глубже и глубже.

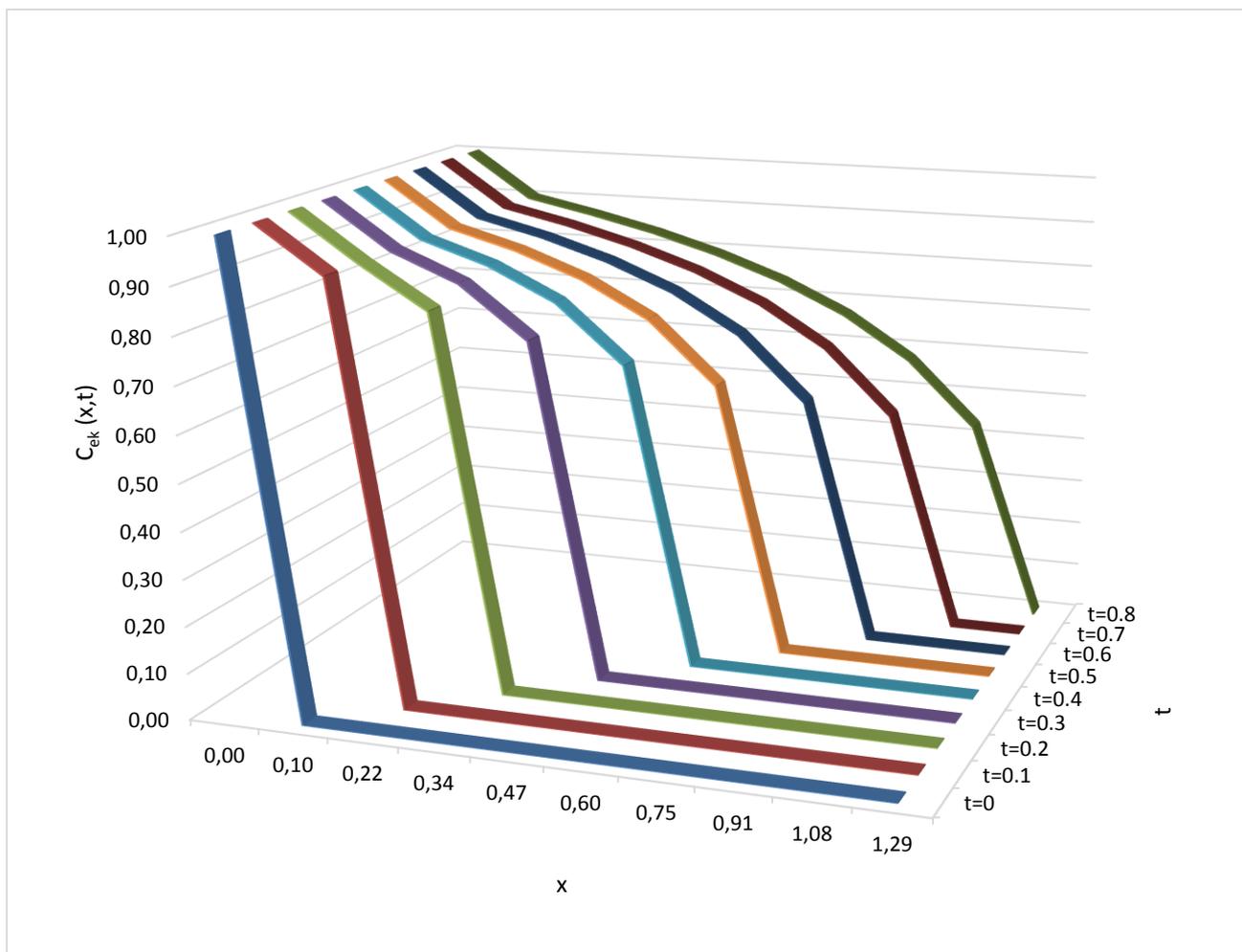


Рис.5.1. Зависимость концентрации C_{ek} от глубины проникновения в продуктивный пласт в разные моменты времени

Рассмотрим изменение температуры от глубины проникновения в пласт с течением времени (рисунок 5.2), происходящее за счет протекания химической реакции. Очевидно, что по мере проникновения в пласт бинарной смеси температура возрастает.

Также следует отметить, что температурная волна отстает от фронта закачки (рисунок 5.3).

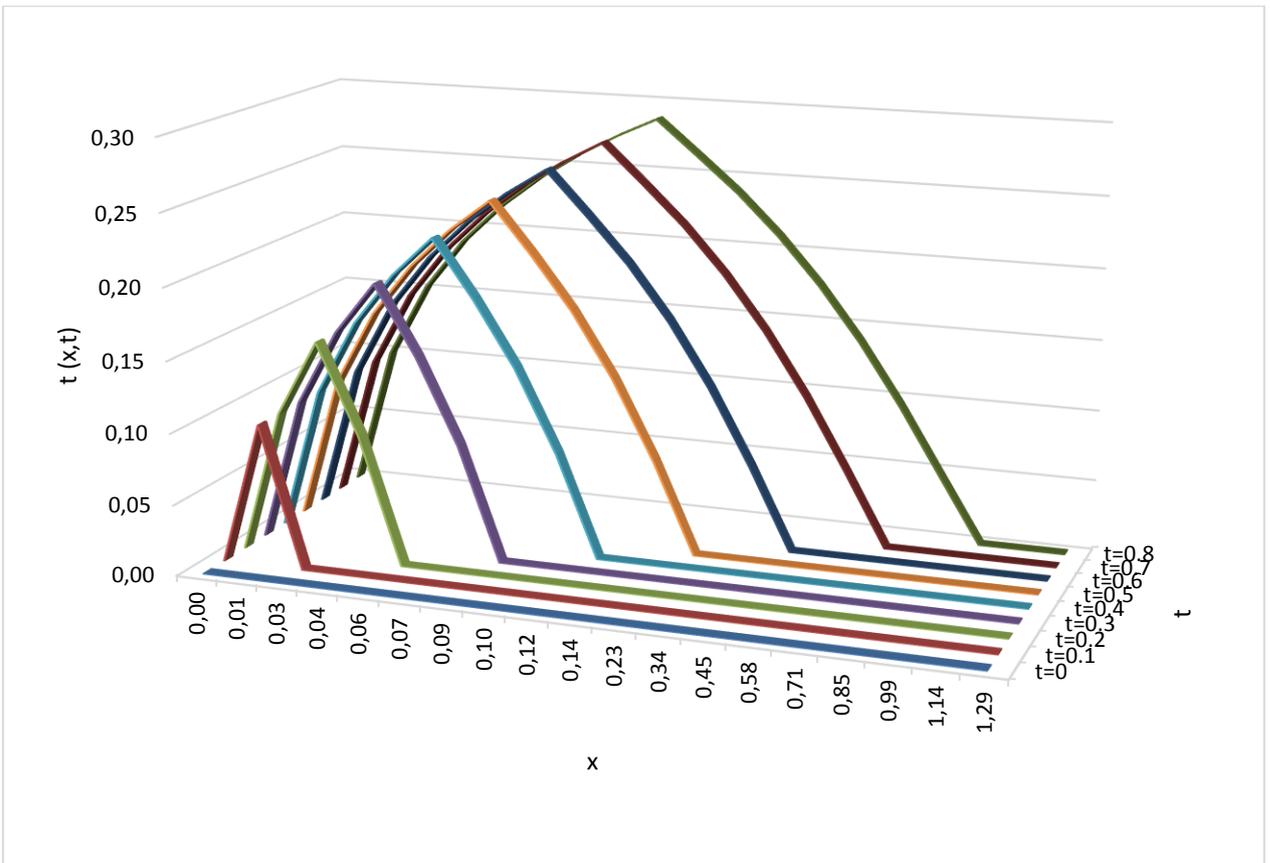


Рис.5.2. Зависимость t от глубины проникновения в продуктивный пласт в различные моменты времени.

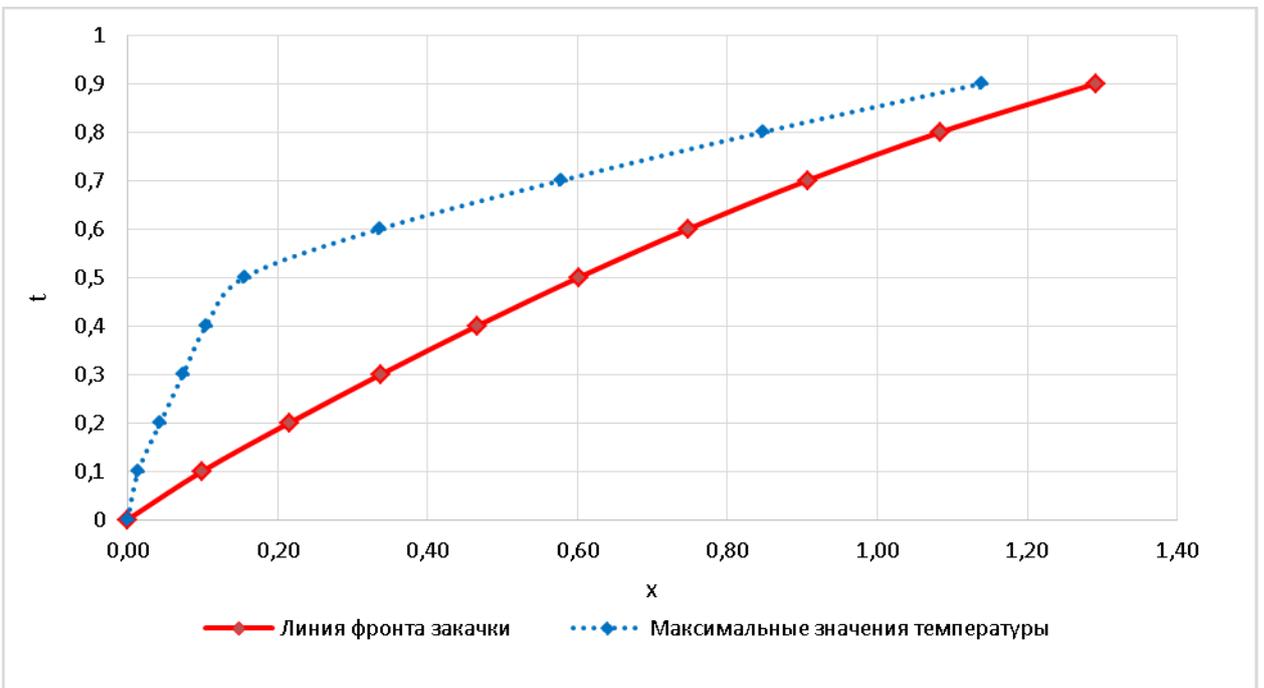


Рис.5.3. Фронт закачки БС и линии максимальных значений t .

Рассмотрим изменение концентрации газа от глубины проникновения в пласт с течением времени (рисунок 5.4). Как уже было показано ранее, по мере того, как бинарная смесь проникает в продуктивный пласт, в нем начинается химическая реакция, которая сопровождается выделением газа. Отсюда и получается, что его концентрация растет. После достижения переднего фронта закачки, концентрация газа принимает начальное значение.

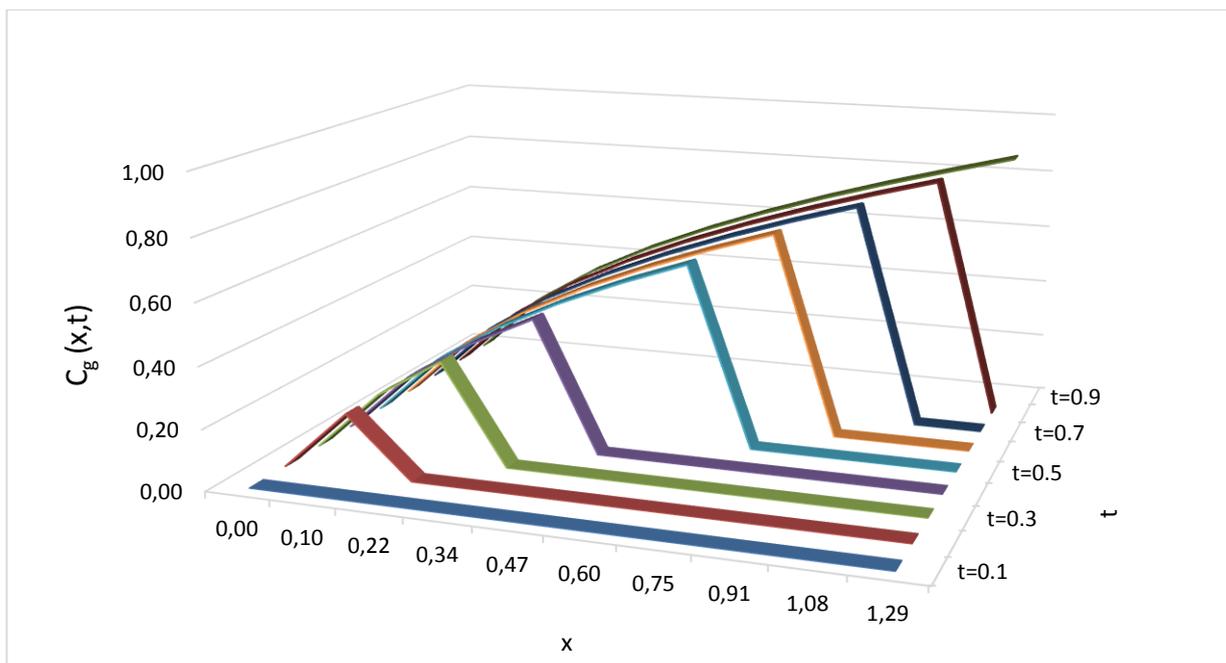


Рис.5.4. Зависимость C_g от глубины проникновения в продуктивный пласт в различные моменты времени.

Для полной системы уравнений (без допущений), поведение величин изменяется.

До фронта температура принимает значение выше, чем температура в прошлом допущении ($T=\text{const}$), так же спад температуры за фронтом происходит не равномерно, а скачкообразно (рисунок 5.5).

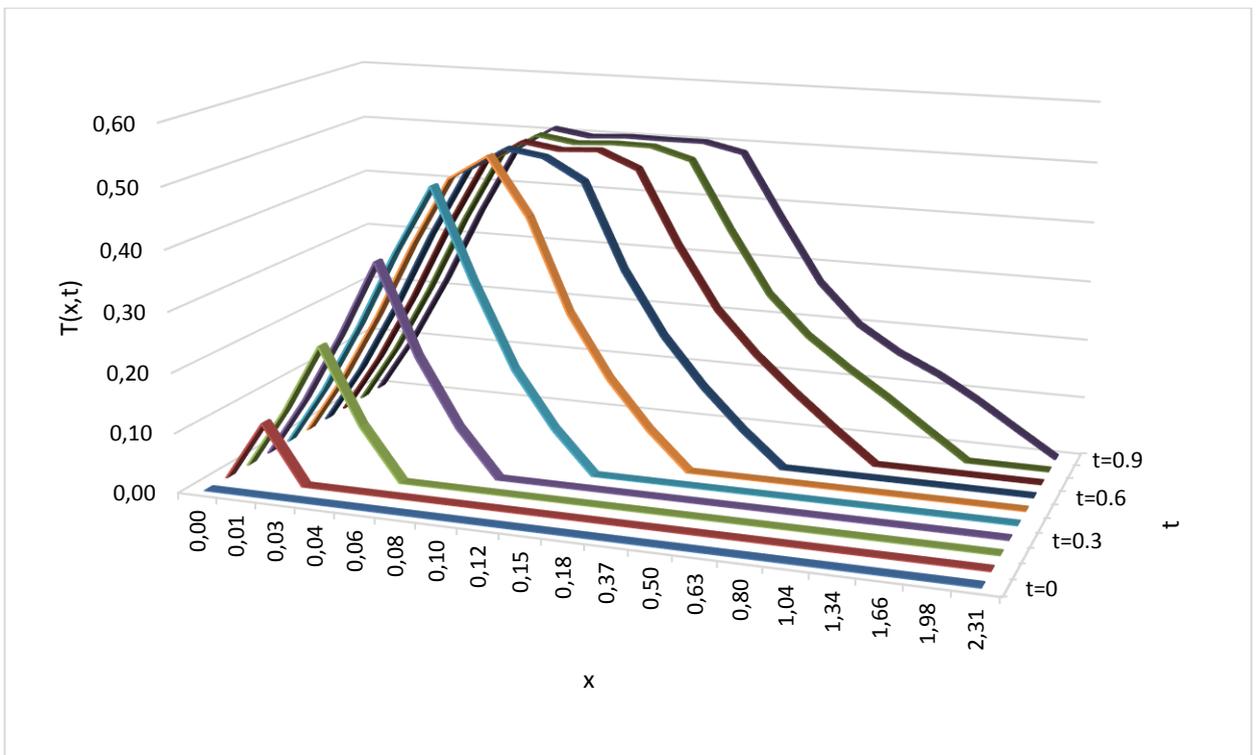


Рис.5.5. Зависимость t от глубины проникновения в продуктивный пласт в различные моменты времени.

Рассмотрим изменение концентрации бинарной смеси (рисунок 5.6). В некоторый момент времени фронт концентрации бинарной смеси начинает проваливаться из-за повышающийся температуры. Из-за того, что распределение температуры по пласту неравномерно, отсюда получаем, что на разных участках пласта, где протекает реакция количество уже вступившей в реакцию бинарной смеси будет разным. Поэтому мы можем наблюдать максимальное проваливание концентрации бинарной смеси на участке, где температура будет максимальной.

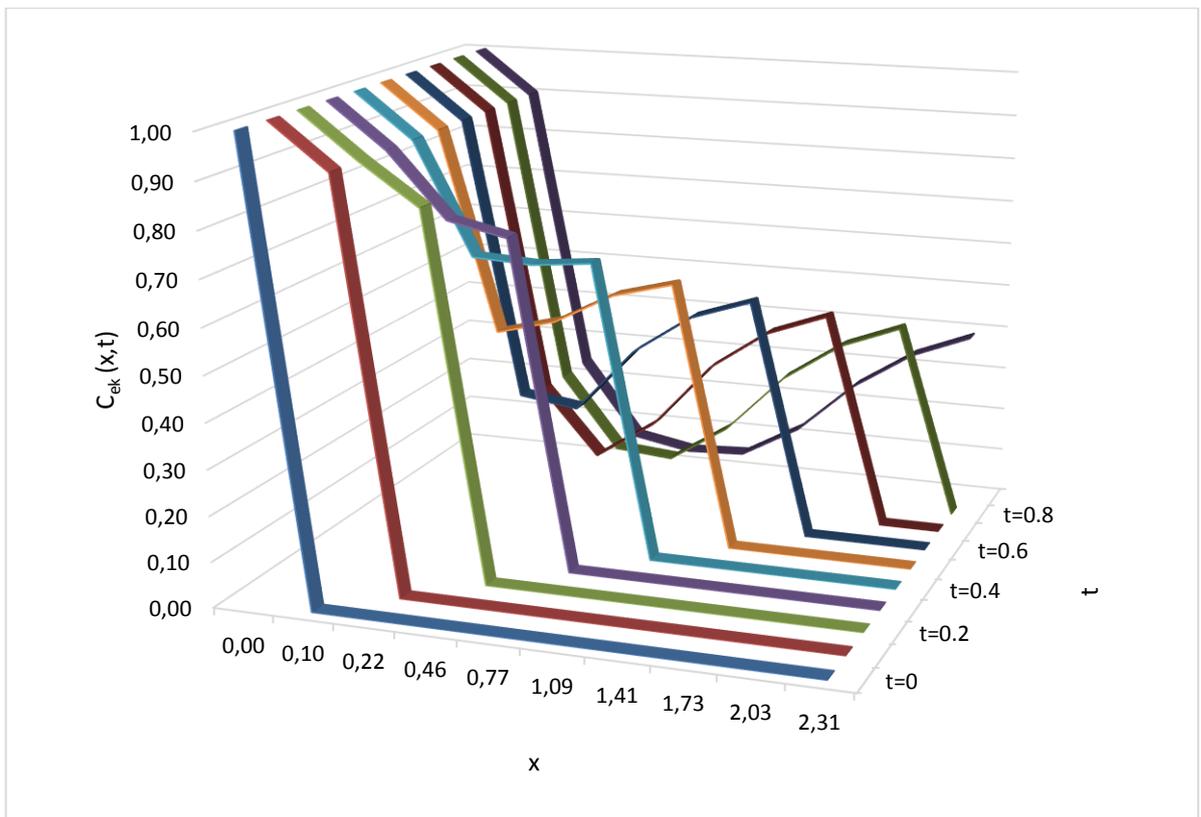


Рис.5.6. Зависимость концентрации C_{ek} от глубины проникновения в продуктивный пласт в различные моменты времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении рассматривается актуальность выбранной темы, сформулированы объект и предмет исследования, определена цель исследований, перечислены задачи, необходимые для достижения поставленной цели.

В разделе «Опыт применения объекта исследования» рассматриваются основные практики, которые применялись в РФ и в США, связанные с закачкой реагирующей бинарной смеси в продуктивный пласт.

В следующем разделе описана кинетика реакции бинарной смеси, то есть получены уравнения для скорости притока/оттока на основании уравнения Аррениуса – уравнения, выражающим зависимость скорости реакции от температуры:

В разделе «Моделирование процесса» происходит построение математической модели, которая описывает процессы, протекающие в призабойной зоне в результате реакции бинарной смеси, а также обезразмеривание системы для дальнейшего численного эксперимента.

Наконец, в разделе «Анализ результатов» проведено аналитическое решение задачи с последующим представлением и анализом полученных результатов.

Все задачи, сформулированные во введении, выполнены в полном объеме, в частности было изучено множество источников данных, получена математическая модель, получены аналитические решения, рассмотрены и проанализированы результаты исследования. Таким образом, цель исследования достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белин В.А. Методы разрушения пласта-коллектора энергией горения энергетических конденсированных систем/В.А. Белин, Н.И. Грибанов, А.А. Шилов, Н.М. Пелых// М.: МГГУ, 2011. – 213 с.
2. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 414с.
3. Заволжский В.Б., Бурко В.А., Идиятуллин А.Р., Басюк Б.Н., Валешный С.И. и др. Термогазохимический состав и способ применения для обработки призабойной и удаленной зоны продуктивного пласта // Патент РФ №2525386с3. Оpubл. 10.08.2014
4. Вершинин В.Е. Механизмы термогазохимического воздействия при обработке скважин бинарными смесями / Вершинин В.Е., Федоров К.М., Лищук А.А. // Доклад для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции и выставке SPE. SPE. - Москва.- 2016.
5. Александров Е.Н., Александров П.Е., Кузнецов Н.М., Лунин В.В., Леменовский Д.А., Рафиков Р.С., Чертенков М.В., Ширяев П.А., Петров А.Л., Лиджи-Горяев В.Ю. Высокотемпературный режим реакции бинарных смесей и стимулирования добычи нефти на обводненных месторождениях // Нефтехимия – 2013. т. 53. №4 – С. 312-320
6. Александров Е.Н., Кузнецов Н.М., Лунин В.В., Леменовский Д.А., Мержанов А.Г., Петров А.Л., Лиджи-Горяев В.Ю. Оценка возможности термохимической технологии повышения нефтеотдачи и минимизация обводнения недр на основе реакции бинарных смесей // Сверхкритические флюиды: теория и практика – 2013. т. 7. № 3 – С. 56-67
7. Азис Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004– С. 16-46, 130-133

8. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002 – С. 91-96
9. Baker L.E. Three-Phase Relative Permeability Correlations, SPE 17369-MS, 1988, SPE Enhanced Oil Recovery Symposium – Tulsa, Oklahoma
10. Жаворонков Н.М. Справочник азотчика – М.: Химия, 1987 – С. 155-159
11. Кузнецов С.В., Федорец А.А., Портнягина Е.В., Поднебесных А.В. Экспериментальное и теоретическое исследование микрокристаллизации парафинов в нефти // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. т. 1. № 3 – С. 14-23
12. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях – М.: Недра, 2000 – С. 361
13. Zhenyu Huang, Hyun Su Lee, Michael Senra and H. Scott Fogler A fundamental model wax deposition in subsea oil pipelines // AIChE Journal – 2011, vol. 57, №11 – p. 2955-2964
14. J. E. Guyer, D. Wheeler, J. A. Warren FiPy: Partial Differential Equations with Python // Computing in Science & Engineering – 2009, №11(3)
15. Могилев А.В. Информатика /А.В. Могилев, Н.И. Пак, Е.К. Хённер // 2-е изд. Учеб. пособие. - М: Изд. центр Академия, 2003. -816 с.
16. Laspe C.G., Roberts L.N. A Mathematical Analysis of Oil and Gas Well Stimulation by Explosive Fracturing. //SPE 3355, 1971
17. Стимулирование добычи нефти продуктами реакций бинарных смесей (БС) как альтернатива технологиям, обводняющим нефтяной пласт. Александров Е.Н., Варфоломеев С.Д., Лиджи–Горяев В.Ю., Петров А.Л. Журнал Точка опоры, ноябрь 2012, № 158, с. 14-15.
18. Высокотемпературное стимулирование добычи нефти Мержанов А.Г., Лунин В.В., Леменовский Д.А., Александров Е.Н., Петров А.Л., Лиджи–Горяев В.Ю. Наука и технологии в промышленности, 2010. Т. 2. С. 1– 6.